

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2

Вібрації в техніці та технологіях



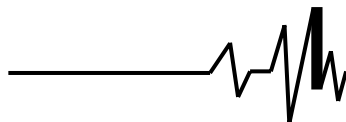
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 2 (97)

Вінниця 2020

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

**Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та
технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця,
2020. – 2 (97) – 162 с.**

**Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного
університету**

**Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань
України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки
України від 02.07.2020 р. № 886)**

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН, Вінницький національний
аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., проф., акад. НААН,
Національний науковий центр “Інститут
механізації та електрифікації сільського
господарства”

Відповідальний секретар

Солоня О.В. – к.т.н., доц., Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., проф., акад. НААН,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України

Веселовська Н.Р. – д.т.н., проф.,
Вінницький національний аграрний
університет

Деревенько А.І. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Зіньковський А.П. – д.т.н., проф., Інститут
проблем міцності імені Г. С. Писаренка
НАН України

Іскович-Лотоцький Р.Д. – д.т.н., проф.,
Вінницький національний технічний
університет

Купчук І.М. – к.т.н., ст.викладач, Вінницький
національний аграрний університет

Надутьий В.П. – д.т.н., проф., Інститут
геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
НАН України

Матвеев В.В. – д.ф.-м.н., проф., академік
НААН, Інститут проблем міцності імені Г.С.
Писаренка НАН України

Ольшанський В.П. – д.ф.-м.н., проф.,
Харківський національний технічний
університет сільського господарства імені
Петра Василенка

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Спірін А.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – к.т.н. доц., Вінницький
національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

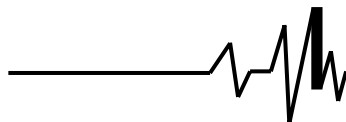
Джордан Тодоров Максимов – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

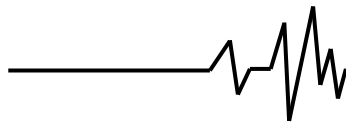
Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Цуркан О. В., Горбатюк Р. М., Присяжнюк Д. В.***ПЛАНУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ.....5***Надутьий В.П., Логинова А.А., Сухарев В.В.***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВУХВАЛЬНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО МОДУЛЯ ОТ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ.....15***Шатохин В. М., Гранько Б. Ф., Соболев В. Н.***МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ШЛАНГОВОМ БЕТОНОНАСОСЕ С ГИДРОПРИВОДОМ.....22***Ольшанський В.П., Сліпченко М. В., Спольнік О. І., Замрій М. А.***ВИЛЬНІ КОЛИВАННЯ ОСЦИЛЯТОРА ЗА НАЯВНОСТІ КВАДРАТИЧНОГО В'ЯЗКОГО ОПОРУ ТА СУХОГО ТЕРТЯ.....33***Ярошенко Л.В., Купчук І.М., Замрій М.А.***РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИН ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО ВІДЦЕНТРОВО-ПЛАНЕТАРНОЇ ОБРОБКИ41***Степаненко С. П., Котов Б. І.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДІЛУ КОМПОНЕНТІВ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ В КОМБІНОВАНОМУ ВІБРАЦІЙНО-ПОВІТРЯНОМУ СЕПАРАТОРІ.....51***Руткевич В. С.***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТА З ДЕТАЛЛЮ ІЗ НАКЛАДАННЯМ ОСЬОВИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ61***Spirin A., Hunko I., Tverdokhlib I., Vovk V.***GRANITE HEAT ACCUMULATORS FOR AIR HEATERS.....72****2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I.***THE CONTACT INTERACTION DYNAMICS OF THE WORKING TOOL OF THE MOLE PLOWSHARE WITH THE SOIL DURING FORMING PROCESS A CHANNEL FOR AN ANTI-FILTRATION SCREEN.....81***Матвійчук В. А., Гайдамак О. Л., Колісник М. А.***ПІДВИЩЕННЯ СЛУЖБОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ І ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ..... 90***Сивак Р.І.***ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИКИ ДЕФОРМУВАННЯ НА ОСНОВІ СПЛАЙН-АПРОКСИМАЦІЇ.....101***Токарчук О.А.***АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФОРМИ І РОЗМІРІВ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ БЕЗСТРУЖКОВИХ МІТЧИКІВ НА ПРОЦЕС ВИДАВЛЮВАННЯ РІЗЬБИ.....108***Граняк В. Ф.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАКЛАДНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА АБСОЛЮТНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ.....123***Алієв Е. Б., Яропуд В.М., Білоус І. М.***ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ В СВИНАРСЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ.....129***Штуць А. А., Служалюк М. О.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОВЕРХНЕВОГО НАГРІВУ ЗАГОТОВОК138****3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Швець Л.В.***ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ..... 149****4. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО***Рекечинський В. І.***ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФУНКЦІЙ ТОКУ В СТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСАХ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ.....157**

**Матвійчук В. А.**

д. т. н., професор

Гайдамак О. Л.

к. т. н., доцент

Колісник М. А.

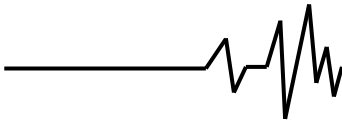
аспірант

*Вінницький національний
аграрний університет***Matviychuk V.****Gaidamak O.****Kolisnyk M.***Vinnitsia National Agrarian
University***УДК 621.73/77****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-10****ПІДВИЩЕННЯ СЛУЖБОВИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНЕВОГО
ШАРУ ДЕТАЛЕЙ ШЛЯХОМ
ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО
ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ І
ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО
НАПИЛЕННЯ**

В статті проведено дослідження зміни характеристик поверхневих шарів деталей, оброблених методами поверхневого пластичного деформування (ППД). Показано, що при ППД зростають характеристики міцності і твердість матеріалу та формуються залишкові напруження стиску. На основі дослідження напружено-деформованого стану матеріалу при ППД встановлено його немонотонність, яка проявляється у поетапній зміні знаку компонент деформацій та напружень. У зв'язку з цим, для оцінки деформівності матеріалу використано тензорно-нелінійну модель накопичення пошкоджень, яка враховує направлений характер пошкоджуваності й анізотропію пластичності деформованого металу. На основі цієї моделі отримано вираз для визначення використаного ресурсу пластичності у випадку багатоетапного ППД. За результатами розрахунків встановлено, що максимальний використаний при ППД ресурс пластичності знаходиться на глибині, що становить приблизно 0,1 від діаметру пластичного відбитка інструменту, а руйнування при повному вичерпанні ресурсу пластичності відбувається у вигляді відшарування тонких пластинок відповідної товщини. Розроблено рекомендації щодо зміщення найбільш зміцнених шарів до поверхні деталі, а також рекомендації щодо обмеження деформування за величиною використаного ресурсу пластичності. Проведене дослідження дозволяє призначати оптимальні режими ППД на стадії проектування технологічного процесу.

Розроблено пристрій для холодного газодинамічного напилення та досліджено можливість створення антифрикційних ділянок з його використанням. Побудовано графіки залежності геометричних параметрів напиленого шару від дистанції напилення та розроблено способи і схеми підготовки до напилення поверхні деталі з використанням методів ППД. Проведено експериментальне холодне газодинамічне напилення та встановлено оптимальні параметри процесу напилення антифрикційних шарів з бронзи та металополімерів (величина тиску, температура стисненого повітря і температура деталі, що обробляється) на сформовану обкатними роликми поверхню деталі. Запропоновано нову концепцію підвищення контактної міцності та зносостійкості пар тертя.

Ключові слова: поверхнево-пластичне деформування, використаний ресурс пластичності, холодне газодинамічне напилення, антифрикційний шар.



Постановка проблеми. В сучасному машинобудуванні особливою увагою наділяють якості й технологічній спадковості деталей машин. Однією із важливих завдань при виготовленні відповідальних деталей є забезпечення високої якості робочих поверхонь і покращення фізико-механічних характеристик матеріалу поверхневого шару. Це стосується, в першу чергу, пар тертя та вузлів з високим питомим навантаженням, міцність яких визначається переважно контактними напруженнями.

Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення експлуатаційних характеристик таких деталей є їх зміцнення та підвищення антифрикційних властивостей. Це здійснюється переважно шляхом підвищення міцності однієї із деталей термічною або хіміко-термічною обробкою (цапфа вала підшипника ковзання, черв'як) і застосування антифрикційного матеріалу для іншої деталі (втулка підшипника ковзання, обід черв'ячного колеса). При цьому під експлуатаційними властивостями розуміють довготривалу роботу деталей без втрати цілісності і геометричних параметрів за весь період експлуатації, а також зменшені втрати від тертя.

Покращувати експлуатаційні властивості поверхневого шару деталей можна також шляхом нанесення на їх поверхню спеціальних металевих, полімерних та композиційних покриттів. Проте стійкість таких покриттів, особливо полімерних, часто є недостатньою внаслідок їх нагрівання при роботі.

Таким чином, формування конструкційних пар, що працюють в умовах підвищеного тертя і контактних напружень, є безумовно актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішувати проблему підвищення контактної міцності, а також міцності деталей на втому [1] дозволяють процеси поверхневого пластичного деформування (ППД).

Методи ППД поділяються на статичні й динамічні (ударні). При статичних методах робоче тіло діє на поверхню деталі з постійною силою, при плавному переміщенні інструмента по поверхні, що підлягає обробці. При ударних методах інструмент, робочі тіла або середовище, багатократно діє на поверхню деталі, при цьому сила дії у кожному циклі змінюється від нуля (чи певного значення) до максимуму.

Фінішна обробка деталей, що ґрунтується на використанні методів ППД, має у порівнянні з токарними, шліфувальними і полірувальними операціями ряд переваг:

- зберігається цілісність волокон металу і формується дрібнозерниста структура-текстура в поверхневому шарі;

- відсутнє накопичення в поверхні, що обробляється, часток шліфувальних кругів і полірувальних паст;

- відсутні термічні дефекти;

- можна досягати мінімального параметра шорсткості поверхні ($R_a = 0,1-0,05$ мкм і менше) як на термічно необроблених сталях, кольорових металах і сплавах, так і на високоміцних матеріалах зі збереженням вихідної форми заготовок;

- можна створювати сприятливу форму мікронерівностей зі значною часткою опорної площі, а також утворювати регулярні мікрорельєфи зі заданою формою заглиблень для утримання мастила;

- в поверхневому шарі створюються сприятливі залишкові напруження стиску;

- плавно підвищується мікротвердість і характеристики міцності поверхневого шару.

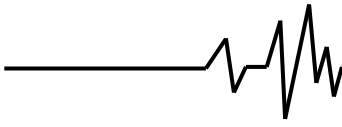
Перераховані переваги методів ППД забезпечують підвищення зносостійкості, опору втомі, контактної витривалості та інших експлуатаційних властивостей деталей на 20-50%, а у випадках вибору найбільш раціонального методу ППД і призначення оптимальних режимів – в 2-3 рази [2, 3].

ППД в поверхневому шарі подрібнює зерно і створює дрібноблочну структуру, покращуючи цим характеристики пластичності матеріалу. Проте, при ППД відбувається накопичення пошкоджень в матеріалі, що зменшує залишкову пластичність. Все це вимагає вивчення деформовності металів і оцінки використаного ресурсу пластичності на якість деталей після ППД.

Варто також зазначити, що зміцнені методами ППД деталі працюють в парах тертя більш довговічно при наявності мастильних матеріалів, які, як правило, можуть витискуватися, що призводить до напівсухого та сухого тертя. Такий контакт, при відносно високих коефіцієнтах тертя, підвищує процес зношування поверхневого шару та призводить до необхідності заміни або ремонту деталі. Існують деталі, наприклад, золотникові пари тертя гідроапаратури, незначний знос яких призводить до суттєвого порушення працездатності всього механізму[4].

Нанесення спеціальних покриттів з антифрикційних матеріалів значно зменшує коефіцієнт тертя, що сприяє суттєвому покращенню експлуатаційних характеристик деталей.

Для зменшення коефіцієнта тертя та унеможливлення витискування з зони контакту мастильних матеріалів, ми пропонуємо



застосовувати в якості матеріалів покриття тверді компоненти, які створюють композиційний поверхневий шар. Він поєднуватиме підвищену твердість і зносостійкість, надану методами ППД, та малий коефіцієнт тертя за рахунок спеціальних покриттів[4].

Основною ідеєю при розв'язанні поставленого завдання є забезпечення високої якості поверхневого шару (механічних та антифрикційних характеристик, використаного ресурсу пластичності) шляхом застосування процесу обкочування у поєднанні зі створенням спеціальних функціональних покриттів газодинамічним напиленням.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей, що працюють в умовах підвищеного тертя і контактних напружень, шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і газодинамічного нанесення покриттів.

Основні результати дослідження.
Зміцнення поверхневого шару методом ППД

Для реалізації поставлених завдань було досліджено вплив параметрів процесу ППД на характер напружено-деформованого стану (НДС) поверхневого шару деталі, а також величину використаного ресурсу пластичності.

Дослідження НДС пластичної зони при втискуванні в заготовку кульки і ролика проводили методом координатних подільних сіток із використанням методики, основаної на теорії R -функцій [4]. Типовий характер розподілу в зоні відбитку ізоліній інтенсивності деформацій $\varepsilon_u = const$ і показника напруженого стану $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$, де $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ – перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень, показаний на рис. 1.

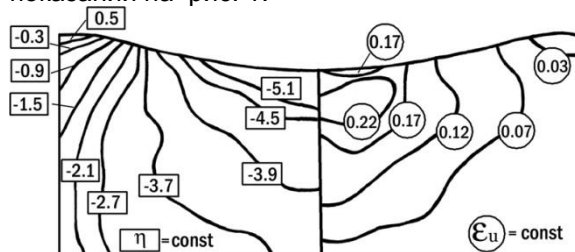


Рис. 1. Розподіл в зоні пластичного відбитку ізоліній: $\eta = const$ (□) і $\varepsilon_u = const$ (○)

Як видно з рис. 1, характер деформованого стану в зоні відбитка є досить нерівномірним. Інтенсивність деформації поблизу поверхні становить лише 50-80% від максимальної. Найбільша деформація спостерігається в центрі відбитку на глибині $\approx 0.1d$ (від поверхні відбитку), де d -діаметр відбитку. Максимальна інтенсивність деформації в зоні відбитка становить приблизно $\varepsilon_u^{max} \approx (0.4..0.5)d/D$, а глибина пластичної зони $h_{pl} = (1.4..1.6)d$, де d і D – діаметр відбитка і кульки відповідно.

Отже, якщо необхідно сформувати тонкий сильно зміцнений шар, то варто застосовувати кульки малого діаметра, призначаючи багатоперехідний процес з максимальною відносною глибиною відбитка. За необхідності формування глибокого, помірно зміцненого шару, варто призначати мало перехідний процес ППД кульками відносно більших розмірів.

В результаті багатократного послідовного втискування інструмента при ППД відбувається зміщення часток металу у різних напрямках, що призводить до зміни знаку компонент деформацій та напружень.

На рис. 2. показаний характер розподілу ізоліній інтенсивності деформацій і показника напруженого стану при трьохкратному втискуванні ролика. Показник напруженого стану змінюється від величин, що відповідають усесторонньому стиску ($\eta = -5..-3$) на осі симетрії відбитка, до зсуву-розтягу ($\eta \geq 0$) на краю відбитка, в місці утворення пластичного валика. При втискуванні інструмента на ділянці між відбитками показник η зростає через зменшення гідростатичного підпору зі сторони відбитків. В центрі заново утвореного відбитка він становить $\eta = -2..-4$, а на його межі $\eta = 0..1$.

Інтенсивність напружень матеріалу поверхневого шару заготовки при ППД, а з урахуванням єдності кривої плинності і інтенсивності деформацій, можна визначати також шляхом вимірювання твердості (мікротвердості). Підвищення твердості пов'язане з дробленням кристалів на фрагменти і блоки, викривленням кристалічної решітки на їх границях, збільшенням дислокацій і вакансій. Все це призводить до збільшення твердості і міцності.

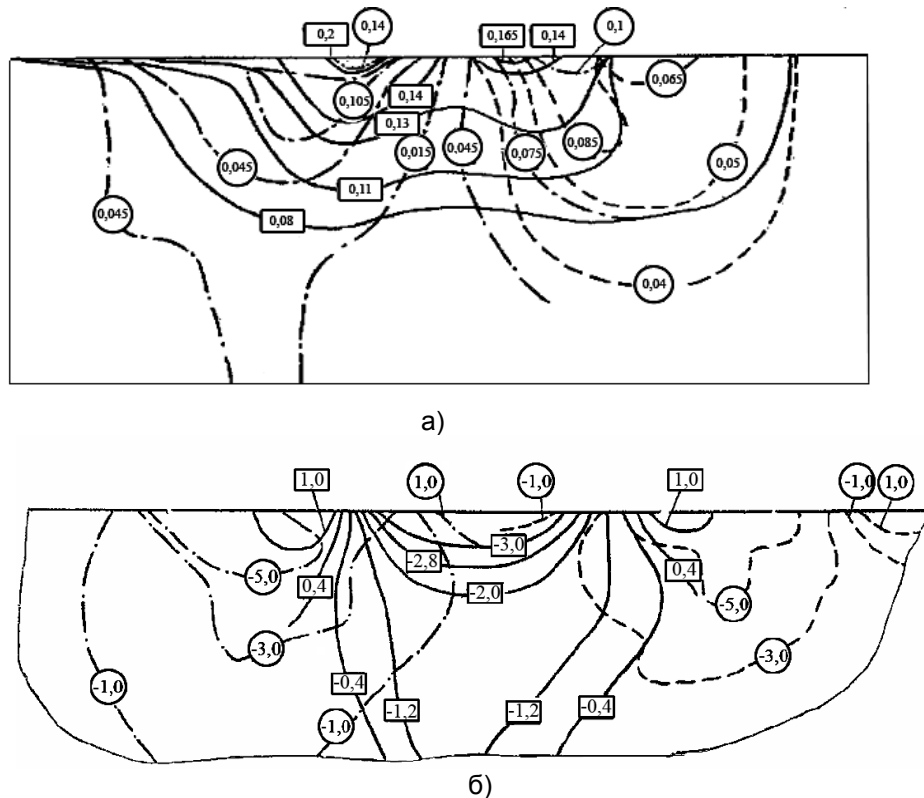


Рис. 2. Характер розподілу інтенсивності деформацій $\epsilon_u = const$ а) і показника напруженого стану $\eta = const$ б) при трьохкратному втискуванні ролика діаметром 12 мм (ширина відбитка 2,5 мм, відстань між першим і другим відбитками 2 мм), після втискування: --- першого; - . - . - . другого; _____ третього.

Поряд зі зміцненням, в поверхневому шарі відбувається розміцнення металу, викликане ефектом Баушінгера через зміну знака деформації. Особливо інтенсивне розміцнення спостерігається при перенаклеп і великому накопиченні пошкоджень, що призводить до подальшого зниження твердості і міцності оброблюваного металу. Отже, головними факторами зменшення твердості є:

а) прояв ефекту Баушінгера, що полягає в знакозмінних деформаціях - посилюється зі зростанням пластичної хвилі, а значить, з ростом глибини деформування;

б) наявність контактної тертя і підвищення температури в зоні контакту;

в) перенаклеп металу і вичерпання ресурсу пластичності.

В якості досліджуваного процесу ППД нами був прийнятий процес обточування циліндричних заготовок роликками і кульками. Для реалізації процесу було спроектовано обкатники, які передбачають обточування деталей на токарних верстатах.

На рис. 3 представлено обкатник, що забезпечує використання кульок різних діаметрів. Зусилля на кульки та глибина їх проникнення в матеріал деталі регулюється пружиною.

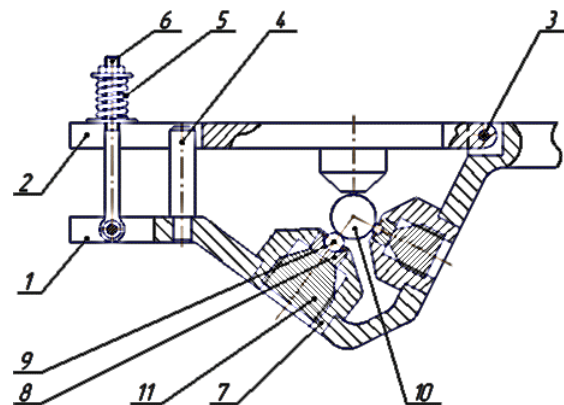


Рис. 3. Загальний вид обкатника. 1 – основа, 2 – рухомий важіль, 3 – вісь важеля, 4 – напрямний штифт, 5 – пружина, 6 – відкидний болт з гайкою, 7 – корпус, 8 – кулькова опора, 9 – кулька, 10 – деталь, що обробляється, 11 – гвинтовий прижим.

Для формування максимально зміцненого шару металу поблизу самої поверхні деталі спільно зі збільшенням товщини зміцненого шару, спочатку обточування здійснюється кульками більшого діаметру, з подальшим переходом на кульки меншого діаметру. При цьому визначальною якістю поверхневого шару є інформація про



величину і характер розподілу накопиченої деформації та використаного ресурсу пластичності ψ_u . Тому деформування передбачає обмеження за величиною використаного ресурсу пластичності металу.

Величину ψ_u металу поверхневого шару при ППД доцільно розраховувати з використанням тензорних моделей накопичення пошкоджень.

При ППД відбувається складне багатоетапне деформування, тому для оцінки деформовності варто використовувати критерії, що враховують направлений характер пошкоджуваності і, відповідно, анізотропію пластичності деформованого металу. Згідно з тензорно-нелінійною моделлю [4] компоненти девіатора пошкоджень можна надати у вигляді.

$$\psi_{ij}(\tilde{\varepsilon}_u) = \int_0^{\tilde{\varepsilon}_u} \left\{ [a_1(D) - b_1(D)] \beta_{ij}(\varepsilon_u) + b_1(D) \left[\beta_{ik}(\varepsilon_u) \beta_{kj}(\varepsilon_u) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right] \right\} f(\varepsilon_u / \varepsilon_*) d\varepsilon_u, \quad (1)$$

де $\tilde{\varepsilon}_u$ - накопичена деформація;
 a, b - параметри моделі, що залежать від матеріалу та показників НДС;

$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{d\varepsilon_u}$ - спрямовуючий тензор

приросту деформацій;

$d\varepsilon_{ij}$ - компонента тензора приросту деформацій;

$$d\varepsilon_u = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}}$$

інтенсивність приросту деформацій.

Функцію f можна записати у вигляді:

$$f(\varepsilon_u) = \frac{n}{\varepsilon_*} \left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_*} \right)^{n-1}, \quad n \geq 1. \quad (2)$$

При складному двоетапному деформуванні, коли в межах кожного етапу $\beta_{ij} = \text{const}$ і $\eta = \text{const}$, відповідно до моделі (1) з урахуванням (2), отримаємо:

$$\psi_2 = \left[\psi_1^n (a^n - I) + \sqrt{\psi_1^{2n} (I^2 - 1) + 1} \right]^{\frac{1}{n}} - \psi_1 a. \quad (3)$$

$$\psi_1 = \frac{\varepsilon_u^{(1)}}{\varepsilon_*^{(1)}}, \quad \psi_2 = \frac{\tilde{\varepsilon}_* - \varepsilon_u^{(2)}}{\varepsilon_*^{(2)}},$$

$$a = \frac{\varepsilon_*^{(1)}}{\varepsilon_*^{(2)}}.$$

де $\varepsilon_u^{(1)}$ - деформація на першому етапі;

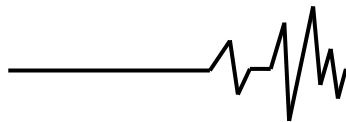
$\tilde{\varepsilon}_*$ - накопичена деформація до руйнування;

$\varepsilon_*^{(1)}, \varepsilon_*^{(2)}$ - гранична деформація, що відповідає напруженому стану і виду деформації на першому і другому етапах;
 I - інваріантний параметр;

ψ_1 і ψ_2 - використаний ресурс пластичності на першому етапі і залишковий ресурс пластичності на другому етапі відповідно.

Процес складного багатоетапного деформування при ППД в локальних зонах заготовки є близьким до схем розтягу (пластична хвиля) і стиску (під деформуючим тілом), а також зсув-стиск, стиск-розтяг.

Спрощеною моделлю процесу є циклічне повторення певної комбінації двоетапного деформування. Згідно з (1), (2), на кінець N-го циклу компоненти тензора пошкоджень визначаються виразом:



$$\begin{aligned} \psi_{ij} = & \left[\left(a^{(1)} - b^{(2)} \right) \beta_{ij}^{(1)} + b^{(1)} \left(\beta_{ik}^{(1)} \beta_{kj}^{(1)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] \psi_1^n \times \\ & \times \left[\sum_{l=1}^N (2l-1)^n - \sum_{l=2}^N (2l-2)^n \right] + \\ & + \left[\left(a^{(2)} - b^{(2)} \right) \beta_{ij}^{(2)} + b^{(2)} \left(\beta_{ik}^{(2)} \beta_{kj}^{(2)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right] \psi_2^n \times \\ & \times \left[\sum_{l=1}^N (2l-1)^n - \sum_{l=2}^N (2l-1)^n \right] \end{aligned} \quad (4)$$

де a і b - первісні функції a_1 і b_1 .

Індекс зверху вказує на належність до непарного «1» і парного «2» півциклів деформування. При виведенні співвідношення (4) вважали, що деформація на всіх півциклах однакова, проте в загальному випадку $\psi_1 \neq \psi_2$ за рахунок того, що $\varepsilon_*^{(1)} \neq \varepsilon_*^{(2)}$.

Позначимо:

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^N (2l-1)^n & \approx \frac{1}{2} \left\{ 1 + (2N-1)^n + \frac{1}{n+1} \left[(2N-1)^{n+1} - 1 \right] \right\}; \\ \sum_{l=1}^N (2l-2)^n & \approx \frac{1}{2} \left[2^n + (2N-2)^n + \frac{(2N-2)^{n+1} - 2^{n+1}}{n+1} \right]. \end{aligned}$$

Тоді:

$$S^{(1)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{n}{n+1} + (2N-1)^n \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2N-1} \right)^n \right] + \frac{(2N-1)^{n+1}}{n+1} \left[1 - \left(\frac{1}{2N-1} \right)^{n+1} \right] - 2^n \frac{n-1}{n+1} \right\}.$$

Розклавши в ряд Тейлора і утримуючи лише два перших члени, отримаємо:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{1}{2N-1} \right)^n & \approx 1 - \frac{n}{2N-1}, \\ \left(1 - \frac{1}{2N-1} \right)^{n+1} & \approx 1 - \frac{n+1}{2N-1}, \end{aligned}$$

Враховуючи, що $2N \gg 1$, а $1 < n < 1.5$, після нескладних перетворень отримаємо:

$$S^{(1)} = 0.5(2N)^n \quad (6)$$

Аналогічно:

$$S^{(2)} = S^{(1)} \quad (7)$$

Використовуючи квадратурні формули методу трапецій, отримаємо:

$$\begin{aligned} S^{(1)} & = \sum_{l=1}^N (2l-1)^n - \sum_{l=2}^N (2l-2)^n, \\ S^{(2)} & = \sum_{l=1}^N (2l)^n - \sum_{l=2}^N (2l-1)^n. \end{aligned} \quad (5)$$

Використовуючи квадратичну міру пошкоджень $\psi_u = \psi_{ij} \psi_{ij}$ ($0 \leq \psi_u \leq 1$), відповідно до (4) - (7), отримаємо:

$$\psi_u = \frac{1}{4} (2N)^{2n} \left[\psi_1^{2n} + 2I(\psi_1 \psi_2)^n + \psi_2^{2n} \right] \leq 1. \quad (8)$$

Використовуючи цей вираз, можна визначити використаний ресурс пластичності у випадку багатоетапного ППД.

Для формування антифрикційної поверхні деталі, на обробленій методами ППД поверхні варто нанести канавки у вигляді дрібномодульного зубчастого профілю шляхом накочування роликками (рис. 4) або гвинтової лінії, сформованої обкочуванням роликком (рис. 5). В даних випадках деформування



протікатиме при «м'яких» схемах напруженого стану і зі зміною схеми НДС.

Дослідження пластичності металів після обкочування до $\psi_u \leq 0,6$ і наступного осаджування показало, що пластичність під час осаджування не зменшувалася, а залишалася

незмінною і навіть дещо збільшувалася. Таким чином визначене формування канавок на поверхні деталі після ППД є цілком прийнятним.

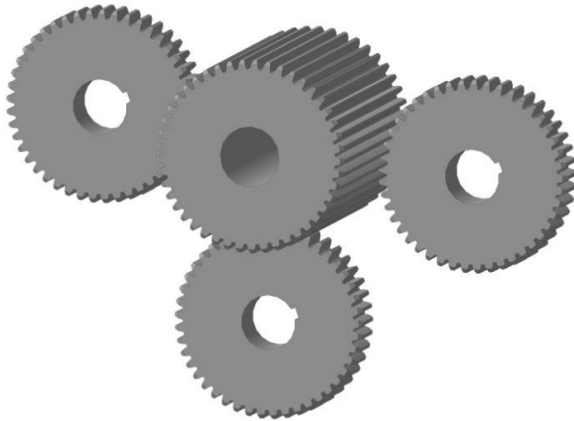


Рис. 4. Схема накочування зубчастими роликми зубчастого профілю

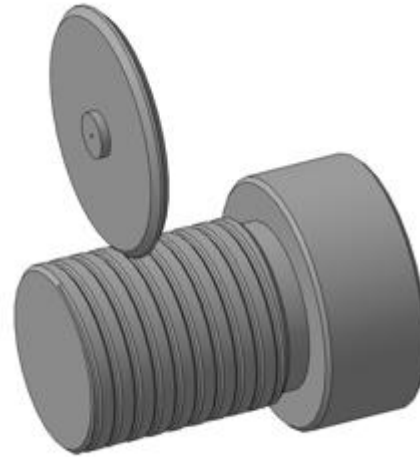


Рис. 5. Схема накочування роликм гвинтової канавки

Створення функціональних антифрикційних покриттів. Переважна більшість газотермічних методів покриття (плазмове, газополуменеве, дугове) проходить при значних температурних впливах, що є несприятним для поверхні деталі, обробленої методами ППД. Для збереження властивостей поверхневого шару після ППД варто вибрати такі методи нанесення покриття за яких температура деталі в процесі її обробки не перевищувала б 200°C . Таким методом є газодинамічне напилення.

Технологія нанесення покриттів газодинамічним методом включає в себе нагрів стисненого повітря, подачу його в надзвукове сопло і формування в цьому соплі надзвукового повітряного потоку, подачу в цей потік порошкового матеріалу, прискорення цього матеріалу в соплі надзвуковим потоком повітря і направлення його на поверхню оброблюваного виробу [5].

В якості порошкових матеріалів використовуються порошки металів, сплавів або їх механічні суміші з керамічними порошками, металополімерів, а також пластмаси. Зміною режимів можна наносити покриття необхідних складів, а також міняти їх пористість і товщину. Порошкові частинки нагріваються до температур 300°C , а поверхня

деталі - до 150°C - 200°C . Процес не створює значного шуму та піддається автоматизації [7, 8].

Газодинамічне напилення має ряд переваг у порівнянні з іншими методами:

1. не вимагає підігріву деталі та ретельної підготовки її поверхні;
2. покриття наноситься на локальні (з чіткими межами) ділянки поверхні;
3. чинить незначний тепловий вплив на деталь;
4. надає можливість нанесення багатокомпонентного покриття з перемінним вмістом компонентів по його товщині;
5. устаткування відрізняється компактністю, мобільністю, малощумністю, технічністю, доступністю, практичністю для будь-якого промислового підприємства, може вбудовуватися в автоматизовані лінії, не вимагає висококваліфікованого персоналу для своєї експлуатації.

Для реалізації процесу газодинамічного напилення у Вінницькому національному аграрному університеті створено пристрій, зовнішній вигляд якого показано на рис. 6 [6].



Рис. 6. Пристрій для газодинамічного наплення

Пристрій складається з двох основних частин: нагрівача стиснутого повітря та прискорювача нагрітого стиснутого повітря. Пристрій має забезпечувати сприятливі умови для створення якісного покриття.

- 1) Температура робочого газу – 300-400° С.
- 2) Тиск робочого газу 0,5-1 МПа.
- 3) Швидкість напилувальних частинок-600-1000 м/с.
- 4) Розмір порошкових частинок - 40-80 мкм.

Проведено дослідження наплення бронзового порошку на дистанціях наплення 10, 30, 50 мм від сталеві підкладки (рис 7).

З метою виявлення закономірностей зміни діаметра основи і форми фігури наплення від дистанції до сопла провели експериментальне дослідження в такій послідовності:

- а) підготували для наплення підкладку зі сталі Ст. 3, розміром 40x40x0,8 мм – 3 шт.
- б) підготували 3 однакових порції порошку, по 2,5 г кожна.
- в) встановили дистанцію для 1, 2, 3, зразків 10, 30, 50 мм відповідно.

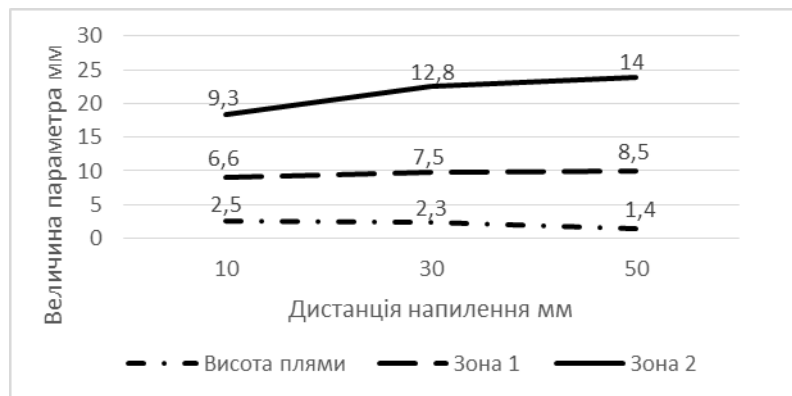


Рис. 8. Графіки зміни геометричних параметрів фігури наплення в залежності від дистанції наплення.

д) запустили установку для наплення, вийшли на робочий режим (тиск 0,56 МПа, температура 320–340°С). Провели наплення на різних дистанціях 10, 30, 50 мм.

В результаті проведеного експерименту досліджено, як змінюються геометричні розміри фігури наплення залежно від дистанції наплення (рис. 8). На рис. 9 представлено типову 3D модель фігури наплення при незмінному положенні сопла і деталі. Це дозволяє обґрунтовувати режими наплення при нанесенні канавок тієї чи іншої форми на поверхні деталі, обробленої попередньо методами ППД.

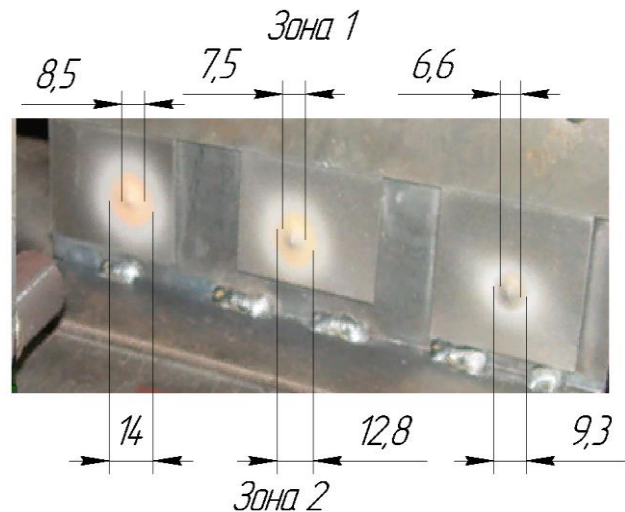


Рис. 7. Результати наплення для дистанцій (справа наліво): 10 мм, 30 мм, 50 мм. Зона 1 – визначає розміри основи фігури наплення, де відбувається інтенсивне нарощування покриття. Зона 2 – визначає розміри основи фігури наплення, де покриття утворилось, але інтенсивність нарощування є незначною.



Рис. 9. Типова 3D модель фігури наплення при напленні в нерухомому положенні.



Відповідно до отриманих результатів напилення, пропонуємо технологію обробки поверхонь пар тертя. Технологія обробки буде складатись з таких основних етапів. Поверхня деталі на першому етапі піддається обробці методами ППД. В результаті цього змінюється поверхневий шар та зменшується його шорсткість. На другому етапі виконуються спіральна або поздовжні канавки (рис. 4-5).

На третьому етапі відбувається напилення в канавки антифрикційного матеріалу (бронза, метало полімер). На четвертому етапі виконується фінішна обробка для зняття надлишків напиленого матеріалу, а за необхідності ще раз застосовується операція ППД.

Деталь після напилення та фінішної обробки показана на рис. 10.

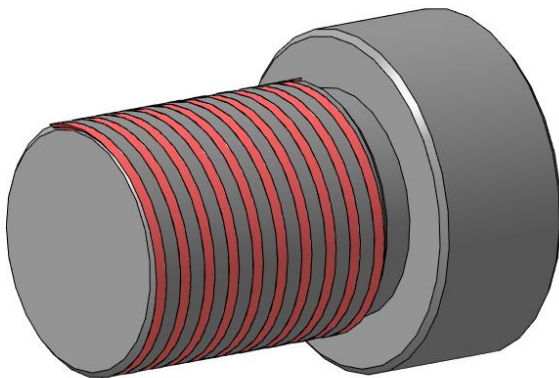


Рис. 10. Деталь після напилення та фінішної обробки

Висновки. 1. Службові характеристики деталей, що працюють в умовах значних контактних навантажень і тертя, залежать від характеристик міцності і антифрикційних характеристик матеріалу поверхневого шару, які можна формувати методами ППД і газодинамічного напилення.

2. Створено модель визначення використаного ресурсу пластичності металів при ППД, яка дозволяє забезпечувати якісні характеристики поверхневого шару на стадії проектування.

3. Досліджено способи зміщення максимально зміщеного шару до поверхні деталі та способи нанесення рельєфного профілю на її відповідальних ділянках.

4. Розроблено і апробовано метод газодинамічного формування антифрикційних матеріалів в канавках рельєфного профілю деталі.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г. М., Чаусов М. Г., Швайко В. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість.-Київ: «Хайт-Тек Прес», 2013. – 528 с.

2. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник.- М: Машиностроение, 1987.- 320 с.

3. Матвійчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография.- Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с.

4. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. – Вінниця: „УНІВЕРСУМ”, 1998. – 195 с.

5. Алхимов А. П. Клинов С.В., Косарев В.Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М : ФИЗМАТЛИТ. 2010. 536 с.

6. Пристрій для газодинамічного нанесення покриттів з радіальною подачею порошкового матеріалу: Пат. 110552 Україна, МПК6 C23C24/00 № а 201405543; заявл. 23.05.14; опубл. 12.01.16, Бюл. №1. 12 с.

7. Гайдамак О. Л. Савуляк В. І. (2018). Експериментальне дослідження процесу холодного газодинамічного нанесення покриття та методика розрахунку його режимів. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 4, 88-94.

8. Гайдамак О. Л, Савуляк В. І. (2016) Дослідження властивостей покриттів, створених холодним газодинамічним напиленням порошку ПА-4. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, 2 (38), 70-73.

References

1. Kaletnik G. M., Chausov M. G., Shvayko V. M. (2013) Fundamentals of Engineering Methods of Strength and Stiffness Calculations: Kyiv: Height-Tech Press. [in Ukrainian].

2. Odintsov L.G. (1987). Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation: Handbook .- М .: Mechanical Engineering. [in Russian].

3. Matviichuk V. A., Aliiev I. S. (2009). Sovershenstvovanye protsessov lokalnoi rotatsyonnoi obrabotky davlenym na osnove analiza deformyruemosti metallov. Kramatorsk. [in Ukrainian].

4. Mikhalevich V. M. (1998) Tensor models of damage accumulation: "UNIVERSUM - Vinnytsia". . [in Ukrainian].

5. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., (2010) Fomin VM Cold gas-dynamic sputtering. Theory and Practice. M: PHYSMATLITE. [in Russian].



6. Device for gas-dynamic coating with radial flow of powder material: Pat. 110552 Ukraine, IPC6 C23C24 / 00 № а 201405543; claimed 05/23/14; publ. 01/12/16, Bul. №1. 12 sec. [in Ukrainian].

7. Gaidamak O. L. Savulak V. I. (2018). Experimental study of cold gas-dynamic coating process and calculation method of its modes. Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute, 4, 88-94. [in Ukrainian].

8. Gaidamak OL, Savuliak VI (2016) Investigation of the properties of coatings created by cold gas-dynamic deposition of PA-4 powder. Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy, 2 (38), 70-73. [in Ukrainian].

ПОВЫШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

В статье проведено исследование изменения характеристик поверхностных слоев деталей, обработанных методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Показано, что при ППД растут прочностные и твердость материала и формируются остаточные напряжения сжатия. На основе исследования напряженно-деформированного состояния материала при ППД установлена его монотонность, которая проявляется в поэтапном изменении знака компонент деформаций и напряжений. В связи с этим для оценки деформируемости материала использованы тензорно-нелинейную модель накопления повреждений, учитывающая направленный характер повреждаемости и анизотропию пластичности деформированного металла. На основе этой модели получено выражение для определения использованного ресурса пластичности в случае многоэтапного ППД. По результатам расчетов установлено, что максимальный использований, при ППД, ресурс пластичности находится на глубине примерно 0,1 от диаметра пластического отпечатка инструмента, а разрушения при полном исчерпании ресурса пластичности происходит в виде отслоения тонких пластинок соответствующей толщины. Разработаны рекомендации по смещению наиболее упрочненных слоев к поверхности детали, а также рекомендации по ограничению деформирования по величине использованного ресурса пластичности. Проведенное исследование позволяет назначать оптимальные режимы ППД на стадии проектирования технологического процесса.

Разработано устройство для холодного газодинамического напыления и исследована возможность создания антифрикционных участков с его использованием. Построены графики зависимости геометрических параметров напыленного слоя от дистанции напыления и разработаны способы и схемы подготовки к напылению поверхности детали с использованием методов ППД. Проведено экспериментальное холодное газодинамическое напыление и установлены оптимальные параметры процесса напыления антифрикционных слоев из бронзы и металлополимеров (величина давления, и температура сжатого воздуха и температура обрабатываемой детали) на сформированную обкаточными роликами поверхность детали. Предложена новая концепция повышения контактной прочности и износостойкости пар трения.

Ключевые слова: поверхностно-пластическое деформирование, использованный ресурс пластичности, холодное газодинамическое напыление, антифрикционный слой.

IMPROVEMENT OF OFFICIAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER DETAILS BY APPLICATION OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION AND GASODYNAMIC PLY

The article investigates changes in the characteristics of the surface layers of parts processed by methods of surface plastic deformation (SPD). It is shown that at SPD the strength and hardness characteristics of the material increase and residual compression stresses are formed. On the basis of the study of the stress-strain state of the material at the SPD, its non-monotonicity is established, which is manifested in the gradual change of sign of the components of deformations and stresses. In this regard, a tensor-nonlinear damage accumulation model was used to evaluate the deformability of the material, which takes into account the directional nature of the damage and the anisotropy of the plasticity of the deformed metal. Based on this model, an expression was obtained to determine the plasticity resource used in the case of multi-stage SPD. According to the results of the calculations, it is established that the maximum plasticity resource used in the SPD is at a depth of approximately 0.1 of the diameter of the plastic footprint of the tool, and destruction at full exhaustion of the plasticity resource occurs in the form of peeling of thin plates of appropriate thickness. Recommendations for displacement of the most reinforced layers to the surface of the workpiece are developed, as well as



recommendations for limiting deformation by the amount of plasticity resource used. The conducted research allows to assign the optimal modes of SPD at the stage of technological process design.

A device for cold gas-dynamic spraying was developed and the possibility of creating antifriction sections using it was investigated. Graphs of dependence of geometrical parameters of the deposited layer on the sputtering distance are constructed and methods and schemes of preparation for deposition of the surface of the workpiece using SPD methods are developed.

Experimental cold gas-dynamic spraying was carried out and optimal parameters of the process of spraying of antifriction layers of bronze and metal polymers (pressure, and the temperature of the compressed air and the temperature of the workpiece) on the formed roller surface were determined. A new concept of increasing the contact strength and durability of friction pairs is proposed.

Keywords: *surface-plastic deformation, used plasticity resource, cold gas-dynamic deposition, antifriction layer.*

Відомості про авторів

Матвійчук Віктор Андрійович – доктор технічних наук, професор, декан інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Гайдамак Олег Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: haidamak@vsau.vin.ua).

Колісник Микола Анатольович – аспірант кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: kolisnik30@gmail.com).

Матвийчук Виктор Андреевич - доктор технических наук, профессор, декан инженерно-технологического факультета Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Гайдамак Олег Леонидович - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехники, электроэнергетики и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: haidamak@vsau.vin.ua).

Колиснык Николай Анатольевич - аспирант кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: kolisnik30@gmail.com).

Viktor Matviychuk - Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Oleg Haidamak - Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Power Engineering and Electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University.

Mykola Kolesnik is a post-graduate student of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: kolisnik30@gmail.com).